

УДК 504.3.064.3 87.17.91

Содержание взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в приземном слое атмосферы г. Тюмени в июне 2020 г.

Р.Ю. Пожитков*

*Институт проблем освоения Севера СО РАН
625026, г. Тюмень ул. Малыгина, 86*

Поступила в редакцию 4.09.2020 г.

Определено содержание взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в приземном слое атмосферы Тюмени. Измерения выполнялись 10–12 июня 2020 г. с помощью ручного портативного счетчика частиц AIR TESTER CW-NAT 200. Содержание частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в воздушной среде города не отличается высокой вариабельностью, а их средние значения в несколько раз меньше максимальных разовых предельно допустимых концентраций, что позволяет сделать вывод об умеренном загрязнении приземного воздуха Тюмени взвешенными частицами. При помощи программного обеспечения ArcGIS 10.6.1 были построены схемы распределения $PM_{2,5}$ и PM_{10} по территории города, выявлены два участка с повышенным уровнем загрязнения, причинами которого следует считать высокую автотранспортную нагрузку и режим ветров соответственно. Проанализировано влияние температуры и относительной влажности воздуха на содержание и распространение взвешенных веществ в приземном слое атмосферы.

Ключевые слова: взвешенные частицы, пылевое загрязнение, $PM_{2,5}$, PM_{10} , экологический мониторинг, Тюмень; particulate matter, dust pollution, $PM_{2,5}$, PM_{10} , environmental monitoring, Tyumen.

Введение

Наблюдения за состоянием атмосферного воздуха в условиях города стали неотъемлемой частью экологического мониторинга урбанизированных территорий. Ростом численности населения города обусловлено увеличение количества возникающих экологических проблем, в числе которых загрязнение атмосферы различными вредными веществами и взвешенными частицами. Всемирная организация здравоохранения в рамках проектов REVIHAAP (Review of evidence on health aspects of air pollution) и HRAPIE (Health risks of air pollution in Europe) подтверждает, что взвешенные частицы с аэродинамическим диаметром менее 10 (PM_{10}) и менее 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) негативно воздействуют на здоровье как при долговременной, так и при кратковременной экспозиции [1] и могут быть причиной заболеваний сердечно-сосудистой, легочно-дыхательной и нервной систем, а также преждевременной смертности.

Актуальность наших исследований подтверждается возросшим количеством отечественных и зарубежных публикаций на эту тему. В [2] приведены результаты мониторинга частиц PM_{10} в приземном слое атмосферы г. Красноярск, а в [3] оценено влияние взвешенных частиц на органы дыхания человека при ремонтно-строительных работах. Содер-

жание $PM_{2,5}$ также выступает основным объектом исследования в трудах российских ученых для Благовещенска [4], Волгограда [5], Казани [6] и Москвы [7]. Немало исследований проводится и в других странах: например, в [8] дана оценка качества воздуха в метро Барселоны, в [9] оценены последствия воздействия взвешенных пылевых частиц на состояние клеточных структур у лабораторных крыс. Также проведены исследования для основных городов Бразилии [10], Китая [11], Польши [12], Украины [13]. Особенно стоит отметить публикацию [14], в которой для 23 европейских городов дана оценка влияния $PM_{2,5}$ на здоровье человека при долгосрочном воздействии.

В Тюмени наблюдается высокий темп роста населения: по данным [15], численность населения Тюмени в период с 2010 по 2019 г. увеличилась более чем на 200 тыс. чел. Следовательно, возрастает количество транспорта. Согласно [16] Тюмень занимает одно из лидирующих мест по обеспеченности населения личными автомобилями, эксплуатация которых (сжигание топлива двигателями внутреннего сгорания, изнашивание дорожного полотна, шин, тормозных колодок) является одним из основных источников поступления взвешенных частиц в атмосферу [1, 17].

Цель настоящей работы — определение концентраций взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в приземном слое атмосферы Тюмени и определение пространственной локализации участков повышенного загрязнения.

* Роман Юрьевич Пожитков (pozhitkov-roma@yandex.ru).

Приборы и методы исследования

Содержание взвешенных частиц в приземном слое атмосферы Тюмени измерялось в 50 точках, большинство из которых – перекрестки дорог с активным движением. Несколько точек находилось в частном секторе города, где используется печное отопление – один из источников поступления взвешенных частиц в атмосферу. Измерения выполнялись с помощью ручного портативного счетчика частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ AIR TESTER CW-NAT 200 на протяжении трех дней (10–12 июня 2020 г.) на высоте 160–170 см от поверхности земли, чтобы смоделировать ситуацию, при которой происходит перенос частиц в органы дыхания человека. Замеры производились в одно и то же время, в период максимальной транспортной загруженности (с 15:00 до 19:00 каждый день). Для исключения возможности получения случайных данных измерения в каждой точке повторялись трижды, а за контрольное значение принималось среднее арифметическое.

Схема точек измерений представлена на рис. 1. Использовалась методика, аналогичная примененной в работах [18–20]. Она основана на регистрации оптического излучения. В качестве источника излучения применяется лазерный диод, который создает оптический луч, попадающий в измерительную камеру, где в дальнейшем он рассеивается аэрозольными частицами, пересекающими луч. Рассеянное излучение фиксируется специализированным фотоприемником; регистрируемый сигнал пропорционален массовой концентрации частиц.

В работе использовалось программное обеспечение ArcGIS 10.6.1, в котором с помощью инструментов интерполяции раstra, а именно интерполяции

методом обратно взвешенных расстояний (ОВР), были созданы схемы распределения взвешенных частиц по территории города. Указанный метод позволяет найти среднее расстояние между точками, основываясь на взвешенном расстоянии до опорных точек (подробнее см. <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>). Самые хорошие результаты метод ОВР дает в том случае, когда плотность сети опорных точек достаточно высока, чтобы отобразить локальную вариацию, которую необходимо смоделировать. Если сеть входных опорных точек редкая и нерегулярная, то результирующая поверхность недостаточно наглядно представляет требуемую [21].

Результаты и обсуждение

Результаты измерений приведены на рис. 2. Диапазон вариаций содержания взвешенных частиц в приземном слое атмосферы Тюмени укладывается в один математический порядок. Среднеарифметическое значение для $PM_{2,5}$ по городу составило 13 мкг/м^3 (минимальное – 5, максимальное – 28 мкг/м^3), PM_{10} – 20 мкг/м^3 (минимальное – 8, максимальное – 39 мкг/м^3).

Для оценки достоверности полученных результатов было проведено сравнение наших данных с данными по содержанию $PM_{2,5}$ в других городах мира (таблица). Результаты сопоставимы практически для всех городов, за исключением Пекина и Агры, где содержание взвешенных частиц в несколько раз выше, что можно объяснить плохой экологической ситуацией в этих городах.



Рис. 1. Карта-схема района работ: 1 – точки измерений; 2 – дороги федерального значения; 3 – ТКАД (Тюменская кольцевая автомобильная дорога); 4 – дороги общегородского значения; 5 – железная дорога

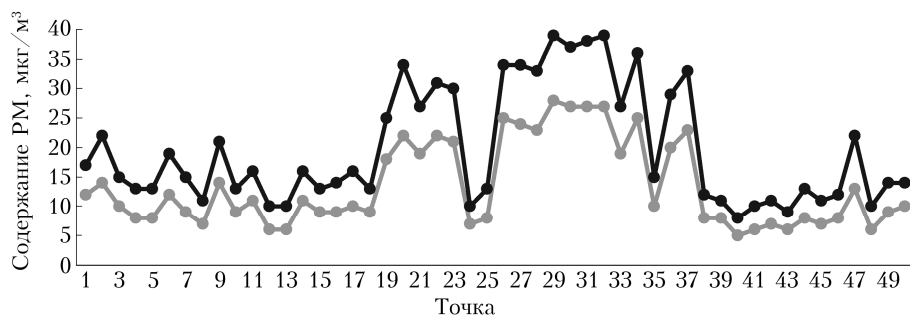


Рис. 2. Содержание частиц $PM_{2,5}$ (серая кривая) и PM_{10} (черная кривая) в приземном слое атмосферы Тюмени

Среднее содержание взвешенных частиц $PM_{2,5}$ летом в некоторых городах мира

Страна, город	$PM_{2,5}$, $мкг/м^3$
Россия, Тюмень (наши данные)	13
США* [22]	16,2
Китай, Пекин [23]	85,8
Бразилия* [10]	15,2
Япония, Иокогама [24]	20,8
Индия, Агра [25]	64,2
Финляндия, Хельсинки [26]	12,1
Украина** [13]	23
Турция, Зонгулдак [27]	32,4
Греция, Афины [28]	25,3
Польша, Забже [29]	18,4
Польша* [12]	13,31

* исследование проводилось в нескольких городах;

** город исследования не указан.

Для гигиенической оценки полученных данных было проведено сравнение результатов с максимальными разовыми предельно допустимыми концентрациями (ПДК_{м.р.}). Согласно [30] ПДК_{м.р.} = 300 и 160 $мкг/м^3$ для PM_{10} и $PM_{2,5}$ соответственно. Исходя из этого сравнения, можно говорить о том, что в целом в Тюмени наблюдается умеренная эко-

логическая нагрузка с точки зрения содержания взвешенных частиц в приземном слое атмосферы, так как максимальные значения PM_{10} и $PM_{2,5}$ в несколько раз меньше ПДК_{м.р.}.

Стоит отметить, что выявленные невысокие значения не исключают угрозы здоровью населения. Во-первых, в [31], где изучено содержание взвешенных частиц для основных городов Италии, показано, что при $PM_{10} > 20 мкг/м^3$ количество смертей составило 8220 в год, или 9% от общей смертности (исключая несчастные случаи) людей старше 30 лет. Во-вторых, важно подчеркнуть, что настоящая работа основана на измерениях, выполненных летом, при этом общеизвестно, что для концентраций частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ характерна сезонная изменчивость, максимальные значения отмечаются зимой, минимальные – летом [13].

Для наглядности распространения взвешенных частиц в приземном слое атмосферы в Тюмени были составлены схемы распределения содержания PM_{10} и $PM_{2,5}$ по территории города, которые позволяют определить «горячие точки» и визуально отобразить характер загрязнения. Результат показан на рис. 3.

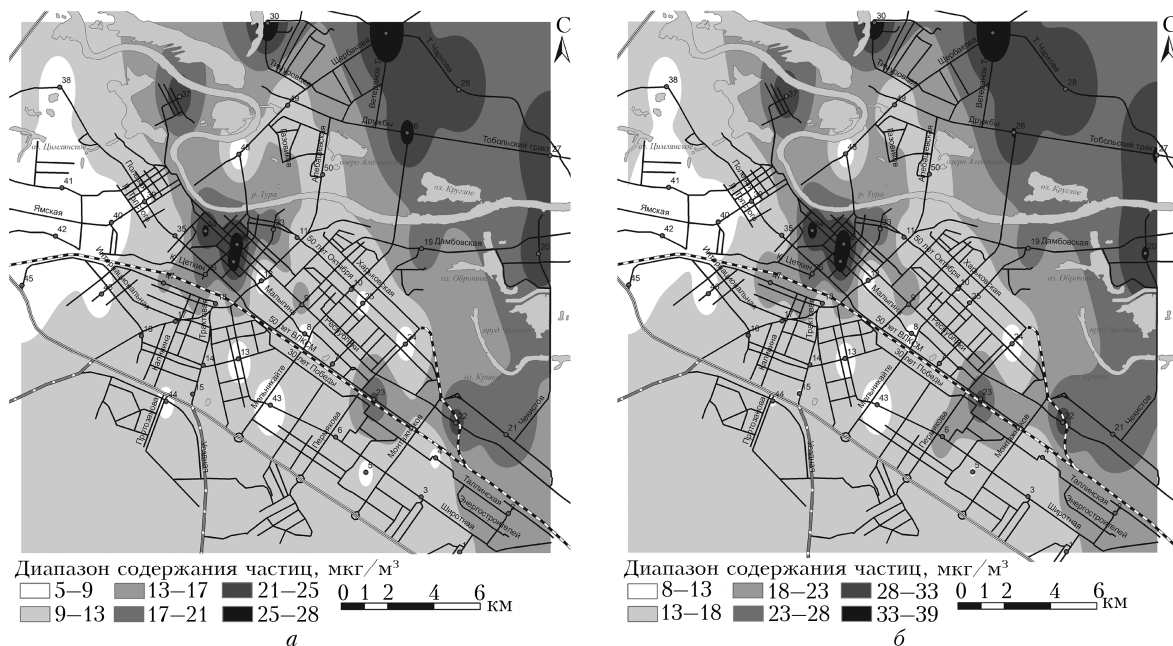


Рис. 3. Распределение содержания взвешенных частиц в приземном воздухе на территории Тюмени: а – $PM_{2,5}$; б – PM_{10}

Распределения $PM_{2,5}$ и PM_{10} практически идентичны. Отмечается наличие двух очагов повышенного загрязнения – это исторический центр города (точки 31–34 на рис. 1) и его северо-восточная часть (точки 26–29). Первый очаг обусловлен высокой интенсивностью движения. Здесь сконцентрированы узкие улицы с большой транспортной нагрузкой и низкой пропускной способностью. Для этого участка города характерны ежедневные «заторы» и «пробки» в «часы пик», поэтому экологическая нагрузка от автотранспорта ощущается наиболее остро.

Второй очаг локализуется в северо-восточной части города, что объясняется многолетним ветровым режимом (роза ветров). Согласно [32] в Тюмени преобладают южные, юго-западные и западные ветра, их ежегодная повторяемость составляет 45%. Подтвердилась их господствующая роль и в июне 2020 г.: повторяемость западного и юго-западного ветров составила 23 и 20% соответственно [33]. В результате характерные особенности циркуляции воздуха способствуют более высокому содержанию частиц на указанном участке города.

Чтобы оценить влияние метеорологических факторов (температура и влажность воздуха; измерялись параллельно с основными измерениями) на содержание взвешенных частиц, была составлена матрица корреляции для указанных параметров:

	$PM_{2,5}$	PM_{10}	$t, ^\circ C$	$RH, \%$
$PM_{2,5}$	1			
PM_{10}	0,99609	1		
$t, ^\circ C$	0,02491	0,02869	1	
$RH, \%$	-0,0556	-0,055	-0,8374	1

(полужирным выделены значения, достоверные при доверительной вероятности $p < 0,05$).

Значения коэффициентов корреляции не показали значимых корреляционных связей между концентрациями PM_{10} и $PM_{2,5}$ и температурой воздуха. Что касается относительной влажности воздуха, для нее отмечается небольшая отрицательная корреляция с концентрацией взвешенных частиц. Аналогичные выводы получены в [20].

Заключение

По результатам измерений 10–12 июня 2020 г. показано, что среднее содержание частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в указанный период было значительно меньше ПДК_{м.р.}, что позволяет говорить об умеренном загрязнении приземного слоя атмосферы Тюмени взвешенными частицами.

Полученные данные о содержании частиц $PM_{2,5}$ в воздушной среде города сопоставимы с результатами аналогичных работ других исследователей в различных городах мира.

В работе не выявлено значимых корреляций между содержанием $PM_{2,5}$ и PM_{10} и температурой воздуха; отмечена слабая отрицательная корреляция с относительной влажностью воздуха.

Определены два участка высокого загрязнения воздуха взвешенными частицами, установлены причины их локализации. В дальнейшем планируется проведение долгосрочного мониторинга содержания частиц пыли именно на этих участках.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-50062\19) и проекта № АААА-А17-117050400146-1 фундаментальных исследований СО РАН.

1. *Всемирная организация здравоохранения*, Европейское региональное бюро. Обзор данных о воздействии загрязнения воздуха на здоровье – проект REVIHAAP. Краткое изложение научного отчета [Электронный ресурс]. URL: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/218574/REVIHAAP-Final-technical-report-Rus.pdf (дата обращения: 15.08.2020).
2. *Заворуева Е.Н., Заворуев В.В., Печенкин Ф.А.* Концентрация взвешенных частиц в приземном слое атмосферы города Красноярск в 2013–2016 годах // *Путь науки*. 2017. № 4(38). С. 13–15.
3. *Калюжина Е.А., Несветаев Г.В., Азаров В.Н.* Исследования значений PM_{10} и $PM_{2,5}$ в выбросах в атмосферу и рабочую зону при ремонтно-строительных работах // *Интернет-вестник ВолГАСУ*. 2012. № 1(20). С. 24.
4. *Голохваст К.С., Козинцев В.В., Кутай В.В., Чайка В.В., Дрозд В.А.* Исследование загрязнения атмосферы города Благовещенска частицами PM_{10} , PM_{10} , PM_{50} // *Бюлл. физиологии и патологии дыхания*. 2018. № 67. С. 41–44. DOI: 10.12737/article_5a9f262e41cf97.42049946.
5. *Азаров В.Н., Калюжина Е.А.* Об организации мониторинга PM_{10} и $PM_{2,5}$ на примере г. Волгограда // *Вестн. Волгоград. гос. архитектурно-строительного ун-та. Сер. Строительство и архитектура*. 2011. № 25(44). С. 398–401.
6. *Степанова Н.В., Фомина С.Ф.* Оценка длительного загрязнения взвешенными частицами $PM_{2,5}$ и PM_{10} атмосферного воздуха г. Казани // *Анализ риска здоровью Rise-2020 и круглым столом по безопасности питания*. Материалы X Всерос. науч.-практ. междунар. конф. В 2 тт. 2020. С. 262–271.
7. *Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е.* Геохимия дорожной пыли (Восточный округ Москвы) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География*. 2015. № 1. С. 23–33.
8. *Querol X., Moreno T., Karanasiou A., Reche C., Alastuey A., Viana M., Font O., Gil J., de Miguel E., Capdevila M.* Variability of levels and composition of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the Barcelona metro system // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 11. P. 5055–5076. DOI: 10.5194/acp-12-5055-2012.
9. *Намазбаева З.И., Базелюк Л.Т., Агеев Д.В., Сабиров Ж.Б.* Изменение функционального состояния клеточных структур у крыс при воздействии взвешенных пылевых частиц ($PM_{2,5}$, PM_{10}) // *Инновации в науке*. 2014. № 34. С. 91–103.
10. *De Miranda R.M., Andrade M. de F., Fornaro A., Astolfo R., de Andre P.A., Saldiva P.* Urban air pollution: a representative survey of $PM_{2,5}$ mass concentrations in six Brazilian cities // *Air Qual., Atmos. Health*. 2012. V. 5, N 1. P. 63–77. DOI: 10.1007/s11869-010-0124-1.
11. *Wang Y.Q., Zhang X.Y., Sun J.Y., Zhang X.C., Che H.Z., Li Y.* Spatial and temporal variations of the concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 in China //

- Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15, N 23. P. 13585–13598. DOI: 10.5194/acp-15-13585-2015.
12. Rogula-Kozłowska W., Klejnowski K., Rogula-Kopiec P., Osrodka L., Krajny E., Blaszezak B., Mathews B. Spatial and seasonal variability of the mass concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Poland // Air Qual., Atmos. Health. 2014. V. 7, N 1. P. 41–58. DOI: 10.1007/s11869-013-0222-y.
 13. Маремуха Т.П., Петросян А.А. Загрязнение атмосферного воздуха фракциями мелкодисперсной пыли (PM₁₀ и PM_{2,5}) в районе функционирования угольной ТЭС // Здоровье и окружающая среда. 2016. № 26. С. 39–42.
 14. Boldo E., Medina S., Le Tertre A., Hurley F., Mücke H-G., Ballester F., Aguilera I., Eilstein D. Apheis: Health impact assessment of long-term exposure to PM_{2.5} in 23 European cities // Eur. J. Epidemiol. 2006. V. 21, N 6. P. 449–458. DOI: 10.1007/s10654-006-9014-0.
 15. Города России. Город Тюмень. Общие сведения и описание Тюмени [Электронный ресурс]. URL: http://xn---7sbiew6aadnema7p.xn--p1ai/sity_id.php?id=25 (дата обращения: 16.08.2020).
 16. Петухов А.С., Кремлева Т.А., Христин Н.А., Петухова Г.А., Кайдунова П.И. Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd) в почвах г. Тюмени // Вестн. Нижневарт. гос. ун-та. 2020. № 1. С. 127–134. DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/19.
 17. Абдулаев Э.К., Грудинин Н.Н. Образование мелкодисперсных твердых частиц PM₁₀ и PM_{2,5} при эксплуатации автомобильных шин // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 43–8. С. 5–7. DOI: 10.18411/lj-10-2018-179.
 18. Li X., Zhang H., Jing J., Huang D. Surface modification of a low-density ceramic for gas-solid separation // Surf. Coat. Technol. 2015. V. 262. P. 103–110. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.12.020.
 19. Zhu X., Lei L., Wang X., Zhang Y. Air quality and passenger comfort in an air-conditioned bus micro-environment // Environ. Monit. Assess. 2018. V. 190, N 5. P. 276. DOI: 10.1007/s10661-018-6593-7.
 20. Liu J., Man Y., Liu Y. Temporal variability of PM₁₀ and PM_{2.5} inside and outside a residential home during 2014 Chinese Spring Festival in Zhengzhou, China // Natural Hazards. 2014. V. 73, N 3. P. 2149–2154. DOI: 10.1007/s11069-014-1157-9.
 21. Watson D.F., Philip G.M. A refinement of inverse distance weighted interpolation // Geo-processing. 1985. V. 2, N 4. P. 315–327.
 22. Bell M.L., Dominici F., Ebisu K., Zeger S.L., Samet J.M. Spatial and temporal variation in PM_{2,5} chemical composition in the United States for health effects studies // Environ. Health Perspect. 2007. V. 115, N 7. P. 989–995. DOI: 10.1289/ehp.9621.
 23. Zhao X., Zhang X., Xu X., Xu J., Meng W., Pu W. Seasonal and diurnal variations of ambient PM_{2.5} concentration in urban and rural environments in Beijing // Atmos. Environ. 2009. V. 43, N 18. P. 2893–2900. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.03.009.
 24. Khan M.F., Shirasuna Y., Hirano K., Masunaga S. Characterization of PM_{2.5}, PM_{2.5}–10 and PM_{>10} in ambient air, Yokohama, Japan // Atmos. Res. 2010. V. 96, N 1. P. 159–172. DOI: 10.1016/j.atmosres.2009.12.009.
 25. Kulshrestha A., Satsangi P.G., Masih J., Taneja A. Metal concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ particles and seasonal variations in urban and rural environment of Agra, India // Sci. Total Environ. 2009. V. 407, N 24. P. 6196–6204. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.08.050.
 26. Sillanpää M., Hillamo R., Kerminen V.M., Pakken T., Salonen R., Pennanen A., Aarnio P., Koskentalo T. Chemical composition and mass balance of an urban aerosol during various seasons // J. Aerosol Sci. 2000. V. 31. P. S309–S310.
 27. Akyüz M., Çabuk H. Meteorological variations of PM_{2.5}/PM₁₀ concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak, Turkey // J. Hazard. Mater. 2009. V. 170, N 1. P. 13–21. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.029.
 28. Sillanpää M., Hillamo R., Saarikoski S., Frey A., Pennanen A., Makkonen U., Spolnik Z., van Grieken R., Branis M., Brunekreef B., Chalbot M-C., Kuhlbusch T., Sunyer J., Kerminen V-M., Kulmala M., Salonen R-O. Chemical composition and mass closure of particulate matter at six urban sites in Europe // Atmos. Environ. 2006. V. 40. P. 212–223. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.01.063.
 29. Rogula-Kozłowska W., Klejnowski K., Rogula-Kopiec P., Mathews B., Szopa S. A Study on the seasonal Mass closure of ambient fine and coarse dusts in Zabrze, Poland // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2012. V. 88, N 5. P. 722–729. DOI: 10.1007/s00128-012-0533-y.
 30. РД 52.04.830-2015. Массовая концентрация взвешенных частиц PM₁₀ и PM_{2,5} в атмосферном воздухе. Методика измерений гравиметрическим методом. СПб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2015. 41 с.
 31. Health impact of PM₁₀ and ozone in 13 Italian cities. Copenhagen: WHO, 2006. 133 p.
 32. Гвоздецкий Н.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 246 с.
 33. Погода в Тюмени в июне 2020 года [Электронный ресурс]. URL: <http://weatherarchive.ru/Temperature/Tyumen/June-2020> (дата обращения 25.08.2020).

R. Yu. Pozhitkov. The content of particulate matter PM_{2,5} and PM₁₀ in the surface air layer of Tyumen in June 2020.

The content of particulate matter PM_{2,5} and PM₁₀ in the surface air layer of the city of Tyumen in June 2020 is estimated. The measurements were made using a hand-held portable particle counter AIR TESTER CW-HAT 200. The content of PM_{2,5} and PM₁₀ in the city air is not highly variable; their average values are several times less than the one-time maximum permissible concentrations. This allows us to conclude that the surface air in Tyumen is moderately polluted with suspended particles. With the help of ArcGIS 10.6.1 software, schemes of the distribution of particles over the city territory are constructed; two highly polluted regions are identified caused by high traffic and wind pattern, respectively. The correlations between the content and distribution of PM_{2,5} and PM₁₀ with air temperature and relative humidity are analyzed.